

RECHERCHES SUR LES ÉLÉMENTS TRACES DANS LES SOLS TROPICAUX: ÉTUDE DE QUELQUES SOLS DE MADAGASCAR

L. NALOVIC et M. PINTA

Laboratoire des Sols O.R.S.T.O.M., Tananarive (Madagascar)
Laboratoire de Spectrographie O.R.S.T.O.M., Bondy (Madagascar)

(Reçu le 8 avril, 1969)

SUMMARY

Study of trace elements in some tropical soils of Madagascar

A study was made of the distribution of trace elements in several soils typical of Madagascar. The aim of this study was to indicate the relationships between element trace distribution and the parent material, the pedogenesis and other factors. The results of the semi-quantitative spectrographic analysis of elements: Mn, Pb, Ga, Ge, Bi, Mo, Sn, V, Cu, Ag, Zn, Zr, Ni, Co, Ti, Cr, Cs, Sr, Ba, Li and Rb, are represented and discussed in three typical soil profiles: (a) ferrallitic soil; (b) a ferruginous soil; (c) an alluvial soil.

RÉSUMÉ

Dans le cadre des recherches pédologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer dans les pays tropicaux, l'étude de la répartition des éléments à l'état de traces a été entreprise sur quelques sols malgaches typiques, dans le but de mettre en évidence le rôle de la roche mère, de la pédogenèse, de la morphologie du profil et autres facteurs. Les résultats des analyses spectrographiques semi-quantitatives des éléments: Mn, Pb, Ga, Ge, Bi, Mo, Sn, V, Cu, Ag, Zn, Zr, Ni, Co, Ti, Cr, Cs, Sr, Ba, Li et Rb sont rapportés et discutés sur trois profils soit: (a) un sol ferrallitique; (b) un sol ferrugineux; (c) un sol sur alluvions.

INTRODUCTION

Les sols malgaches les plus répandus sont les sols ferrallitiques, les sols ferrugineux tropicaux, les sols développés sur alluvions. Ces sols ont été étudiés du point de vue pédologique et cartographique par Besairie (1937), Humbert (1949), Segalen et Moureaux (1950), Segalen (1956a,b,c,d,e), Riquier (1957), Hervieu (1958, 1959, 1960, 1961, 1963), Bourgeat et al. (1964).

Complémentairement à ces travaux, nous avons entrepris l'étude physico-chimique des éléments à l'état de traces et de leur répartition dans ces sols, problème autrefois abordé par Lacroix (1923), qui soulignait à l'époque la richesse relative des roches et sols en éléments traces,

récemment confirmée par Hervieu et Nalovic (1965). Nous avons repris une étude plus générale portant sur 26 profils soit: 9 sols ferrallitiques, 7 sols ferrugineux, 10 sols sur alluvions. Nous ne rapporterons pas dans cette courte note l'ensemble des résultats analytiques: nous présentons pour chaque type de sol un profil choisi comme particulièrement représentatif en ce qui concerne la répartition des éléments traces, étant entendu que les conclusions et observations que nous sommes amenés à faire sont valables pour l'ensemble des sols dans chaque classe étudiée.

METHODES D'ANALYSES

Chaque échantillon a été soumis à une analyse totale aussi complète que possible, portant sur les constituants de base et les éléments traces. Les principaux facteurs paraissant jouer un rôle sur l'évolution des éléments traces sont: pH, matière organique, argiles, silice, hydroxydes de fer et d'alumine, granulométrie (Nalovic et al., 1968). Les éléments traces recherchés sont: argent, baryum, bismuth, césium, chrome, cobalt, cuivre, étain, gallium, germanium, lithium, manganèse, molybdène, nickel, plomb, rubidium, strontium, titane, vanadium, zinc, zirconium.

Tous ces éléments sont recherchés et déterminés par spectrographie d'émission dans l'arc, selon une technique semi-quantitative de comparaison des caractéristiques de raies (Pinta, 1961).

Un échantillon moyen est calciné à 600°C, le résidu, homogénéisé et broyé.

Un premier examen spectrographique est effectué dans les conditions suivantes:

(1) Mélange spectrographié: 25 mg de produit et 25 mg de poudre de graphite.

(2) Electrodes: graphite "Carbone Lorraine" qualité 207; (a) anode, baguette de graphite de diamètre 6,5 mm, avec cratère de 3 mm de diamètre et 4 mm de profondeur; (b) cathode, baguette de graphite de 6 mm de diamètre; distance entre les électrodes, 7 mm.

(3) Arc: arc en courant continu 12 A, 60 V en charge; l'échantillon est placé dans l'anode.

TABLEAU I

Éléments, raies d'analyse et seuil de detection spectrographique

Éléments	λ (Å)	p.p.m.	éléments	λ (Å)	p.p.m.
Mn	2.576,10	30	Zr	3.391,97	10
Pb	2.833,07	10	Ni	3.414,76	3
Ga	2.943,64	3	Co	3.453,50	3
Ge	3.039,06	10	Ti	3.653,50	10
Bi	3.067,71	10	Cr	4.254,34	30
Mo	3.170,35	3	Cs	4.555,35	100
Sn	3.175,02	3	Sr	4.607,33	3
V	3.185,39	10	Ba	5.535,55	10
Cu	3.274,54	3	Li	6.707,84	3
Ag	3.280,68	3	Rb	7.800,23	10
Zn	3.345,02	300			

(4) Projection de la source sur le collimateur du spectrographe avec emploi d'un secteur à échelon dans le trajet du faisceau.

(5) Spectrographe: appareil Littrow à prisme de quartz (Hilger).

(6) Largeur de fente: 7 μ .

(7) Plaque photographique: spectrum analysis.

(8) Temps de pose: 1 min 30 sec.

(9) Étalonnage: deux ou trois échantillons synthétiques à teneurs croissantes en éléments traces sont spectrographiés dans les mêmes conditions sur chaque plaque.

Chaque échantillon est analysé deux fois. Les raies sont repérées au comparateur et mesurées au densitomètre. Pour une même plaque, la caractéristique de chaque raie, définie par la densité optique en fonction de l'exposition, est tracée sur un graphique. L'étalonnage est constitué par la courbe suivante:

(1) Ordonnées: position relative des caractéristiques des raies des produits synthétiques d'étalonnage.

(2) Abscisses: concentration ou log. conc. des étalons.

Les raies utilisées (en Angstroms) et les seuils de détection des dosages, exprimés par les plus petites concentrations d'éléments en p.p.m. de produit spectrographié sont donnés Tableau I.

Dans les conditions précédentes, ces valeurs sont parfois insuffisantes, pour déceler dans les sols, en particulier: Bi, Cs, Ga, Ge, Mo, Sn, Zn.

Un second examen spectrographique est effectué de manière à détecter les concentrations 5 à 10 fois plus faibles. Les conditions sont les suivantes.

(1) Electrodes, comme précédemment.

(2) Distance entre électrodes, 2 mm.

(3) Arc, comme précédemment.

(4) Projection de la source sur la fente du spectrographe: projection directe à l'aide d'une lentille.

(5) Temps de pose, 1 min.

(6) Autres conditions, comme précédemment.

CARACTÈRES GÉNÉRAUX DES PROFILS DE SOLS ÉTUDIÉS

Sol brun-rouge ferrallitique sur cipolin

Description

Profil: NOL 21/25 (Hervieu, 1966).

Situation: Poste d'Ambatofinandrahana, près du village Tetikanana.

$X = 445$; $Y = 617,5$; $Z = 1650$ m.

Climat: $P = 1360$ mm; $T = 17^{\circ}4$.

Unité géomorphologique: relief de hautes terres à dissection profonde.

Végétation: prairie dense a *Hyparrhenia* sp., *Imperata*, *Eragrostis* sp.,
Aloe capitata sur les affleurements rocheux.

Topographie: petits plateaux à pente assez forte (15° - 25°) et thalwegs très encaissés. Érosion en décrochements ou en paliers.

Roche mère: série des Cipolins (couverture paléozoïque du socle).

Morphologie:

0-18 cm : brun foncé (Munsell à sec: 5 YR-4/2; humide: 7,5 YR-3/2)
humifère, argilo-sableux fin; à structure grumeleuse bien

- développée, secondairement particulaire fine. Racines abondantes, porosité élevée, cohésion moyenne.
- 18-40 cm : brun-rouge (Munsell à sec: 7,5 YR-4/4, humide: 5 YR-3/4); argilo-sableux fin. Structure faiblement grumeleuse à nuciforme, secondairement particulaire, assez humifère, enracinement abondant. Quelques migrations d'humus plus foncées sur trajets de racines et quelques fentes de dessiccation. Porosité encore élevée.
- 40-85 cm : brunâtre (Munsell à sec: 10 YR-4/3, humide: 5 YR-3/3); peu humifère, sableux fin, structure diffuse à particulaire fine, enracinement moyen, poreux, cohésion faible.
- 85-130 cm: horizon de transition brun clair (Munsell à sec: 10 YR-5/3, humide: 7,5 YR-3/4); sableux fin à sablo-limoneux, structure massive secondairement particulaire fine. Enracinement faible, cohésion faible.
- 130-280 cm: cipolin très altéré jaune-ocre à jaune-olivâtre (Munsell à sec: 10 YR-6/3, humide: 10 YR-4/2); tacheté de noir et de rouille; sableux fin, meuble, peu cohérent, enracinement quasi nul. Litage à 45° encore visible.

Caractères physiques et chimiques

Réaction. Le pH du sol est faiblement acide avec un minimum plus fortement acide dans l'horizon brun-rouge (pH 5,3).

Granulométrie. Les deux horizons supérieurs contiennent 30-40% d'argile avec un rapport limon/argile variant entre 0,4 et 0,5. Il y a très peu de sable grossier et le sable fin augmente en profondeur, dépassant 75% dans la roche altérée.

Matière organique. Le taux de matière organique dépasse 8% dans l'horizon de surface et 4% dans l'horizon sousjacent. Il est inférieur à 0,2% dans les horizons profonds. L'humidification est plutôt faible et le rapport C/N varie entre 18 et 13.

Complexe absorbant. Exception faite pour le calcium et le magnésium dans l'horizon de surface et le matériau originel, le sol est plutôt pauvre en éléments échangeables et la capacité d'échange du complexe moyenne à faible. Le pourcentage de saturation présente un minimum (45%) dans l'horizon brun-rouge.

Les teneurs en fer libre varient peu dans le profil: 4,5-5,5%. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ augmente progressivement en profondeur et passe de 1,4 à 2,1% dans le sol, pour atteindre 3,0% dans le matériau originel.

La fraction argileuse dans les horizons du sol contient surtout de la kaolinite avec des quantités notables d'hydroxydes. Présence probable d'illite dans le matériau originel.

Éléments traces

Ce profil de sol ferrallitique sur cipolin se caractérise par des teneurs en éléments traces très élevées, notamment en manganèse, vanadium, cuivre, nickel, cobalt, chrome, baryum et lithium: (Tableau II).

La plupart des éléments étudiés décroissent légèrement avec la profondeur mais sont encore élevés dans la roche altérée, malgré un taux faible d'éléments fins (argile + limons = 18% contre 47 à 53% dans le sol).

TABLEAU II

Sol brun rouge ferrallitique sur cipolin

		Horizons:	NOL 21	NOL 22	NOL 23	NOL 24	NOL 25
		Profondeur (cm):	0-18	18-40	40-85	85-130	130-280
Argile < 0,002 mm	(%)		33,6	39,3	12,7	14,9	10,0
Limon 0,02-0,002 mm	(%)		19,2	15,5	34,9	36,8	8,0
Sable > 0,02 mm	(%)		45,2	43,7	51,5	47,5	81,4
SiO ₂	(%)		14,45	14,56	15,65	17,10	31,53
Fe ₂ O ₃	(%)		8,77	10,77	10,83	9,48	0,01
Al ₂ O ₃	(%)		16,95	15,35	13,71	13,92	13,26
Mo	(%)		8,2	4,3	0,2	0,2	0,1
pH			6,5	5,3	5,9	6,4	6,2

Éléments traces (p.p.m.)

Mn	8300	16500	13500	7500	2800
Pb	21	17	23	18	14
Ga	17	9	9	9	9
Ge	17	9	9	9	9
Bi	< 8	< 9	< 9	< 9	< 9
Mo	17	9	9	2,8	< 2,8
Sn	6	6	4,5	2,8	< 2,8
V	126	170	135	140	190
Cu	42	70	91	64	56
Ag	< 2,5	3,5	4,6	2,8	< 2,8
Zn	< 250	< 260	< 270	< 280	< 280
Zr	500	260	360	460	370
Ni	170	175	180	185	140
Co	33	35	36	37	19
Ti	3300	4500	3600	4600	9300
Cr	165	130	135	140	930
Cs	< 80	< 85	< 90	< 90	< 95
Sr	100	85	46	46	95
Ba	250	260	900	900	1400
Li	165	350	455	275	465
Rb	25	9	14	18	23

L'horizon d'altération (No.25) est le plus riche en vanadium, titane, chrome, baryum et lithium.

Le taux de matière organique, relativement élevé dans les deux horizons supérieurs (No.21-22), ne semble pas avoir d'influence sur la distribution des éléments traces:

Dans ce profil, on a pu déceler les éléments germanium, molybdène, étain, argent.

Les résultats sont donnés Tableau II.

*Sol ferrugineux tropical sur matériaux calcaires**Description*

Profil: TH 76/77 (Hervieu, 1966)

Situation: environs d'Ankazoabo, près du village Andranoboka. X = 200,5;
Y = 420,4; Z = 400 m.

Climat: $P = 720$ mm; $T = 25^{\circ}$.

Unité géomorphologique: terrasse ancienne de la rivière Sakanavaka.
Végétation: savane arborée et arbustive à *Heteropogon contortus*.

Roche mère: alluvions anciennes calcaires (produits de remaniements de l'Isalo-Jurassique-série de la Sakanavaka à faciès mixte).

Morphologie:

- 0-15 cm : brun-rougeâtre (Munsell à sec: 5 YR-4/2, humide: 5 YR-4/3), un peu humifère, matière organique bien mélangée. Argilo-sableux, structure massive à faiblement nuciforme, secondairement particulaire. Porosité assez élevée, enracinement moyen.
- 15-200 cm: rouge (Munsell à sec: 5 YR-4/6, humide: 2,5 YR-4/8), assez durci et tassé. Argilo-sableux, structure massive à grossièrement nuciforme, secondairement particulaire. Porosité moyenne, enracinement faible à nul.
- 200-240 cm: passage progressif à un horizon jaunâtre (Munsell à sec: 7,5 YR-5/8, humide: 10 YR-5/6). Sable argileux, massif, peu ou pas calcaire (horizon de transition).
- 240 cm: matériau originel jaune blanchâtre (Munsell à sec: 10 YR-8/3, humide: 10 YR-6/3), plus ou moins calcaire avec passages riches en nodules calcaires, l'ensemble étant assez cohérent en place. Sableux fin, pulvérulent après désagrégation. Localement, on observe de petits encroûtements et des niveaux riches en petits galets de roches basiques.

Vers 7-8 m, à la base de la coupe, on observe une zone tachetée grise et jaune dans les sables et gravillons fluviaux peu ou pas consolidés avec lits de galets de roches noires basiques. L'ensemble repose sur des argiles gréseuses polyédriques de la série de la Sakanavaka.

Caractères physiques et chimiques

Réaction. Le pH est faiblement acide à neutre dans le sol rubéfié modérément alcalin dans le matériau originel.

Granulométrie. La fraction sableuse domine dans ce profil, sans variations importantes (entre 75 et 85%). L'argile, peu abondante, ne dépasse pas 25% dans la plus grande partie du profil et décroît rapidement pour atteindre 3% dans la roche-mère (après décalcification). La teneur en calcaire atteint 15% dans le matériau originel; il n'y en a plus que 2% dans l'horizon de transition et des traces dans le sol.

Matière organique. Le taux de matière organique est très faible en surface et insignifiant dans le reste du profil. L'humidification est assez bonne (entre 35 et 40%) avec un rapport C/N de 12.

Complexe absorbant. La capacité d'échange est moyenne, le taux de saturation varie autour de 65% et le complexe est assez bien pourvu en calcium et magnésium. Les réserves minérales sont très bonnes. Les teneurs en fer libre varient de 1,4 à 2,8%. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ est assez élevé: 2,6% en surface et 4,5-3,9% en profondeur. La fraction argileuse est constituée en grande partie par des produits amorphes. La présence d'une association kaolinite-montmorillonite est cependant décelable en faible quantité.

Éléments traces

Dans ce profil de sol ferrugineux tropical sur matériau calcaire, on observe relativement de faibles teneurs en éléments traces, à l'exception du zirconium, des alcalins et alcalino-terreux.

Malgré une texture sableuse, il est difficile de mettre en évidence un appauvrissement en éléments traces dû au lessivage car leur distribution est régulière dans la plupart des cas. Les teneurs en manganèse, plomb, vanadium, cuivre, nickel, cobalt, strontium et lithium décroissent avec la profondeur, mais l'horizon d'altération No.77 conserve des teneurs importantes en alcalins et alcalino-terreux. Dans ce profil, il a été décelé du bismuth. Par contre, il n'a pas été décelé de molybdène, d'étain, d'argent. Les résultats d'analyses sont donnés dans le Tableau III.

TABLEAU III

Sol ferrugineux tropical sur matériaux calcaires

Horizons: Profondeur (cm):	TH 76 0-15	TH 76a 15-200	TH 76b 200-240	TH 77 > 240
Argile < 0,002 mm (%)	20,5	26,1	8,1	8,1
Limon 0,02-0,002 mm (%)	3,5	3,9	3,1	8,7
Sable > 0,02 mm (%)	75,3	69,3	88,4	82,5
SiO ₂ (%)	6,7	9,4	13,7	17,8
Fe ₂ O ₃ (%)	4,4	5,2	6,2	5,2
Al ₂ O ₃ (%)	4,4	3,6	6,00	5,1
Mo (%)	1,1	0,3	0,3	0,1
pH	6,9	6,0	6,6	8,2

Éléments traces (p.p.m.)

Mn	680	490	390	460
Pb	24	20	24	18
Ga	5	8	10	5
Ge	< 10	< 10	< 10	< 10
Bi	10	10	10	9
Mo	< 2,9	< 2,9	< 2,9	< 2,8
Sn	< 2,9	< 2,9	< 2,9	< 2,8
V	58	49	49	37
Cu	24	24	19	18
Ag	< 2,9	< 2,9	< 2,9	< 2,8
Zn	< 290	< 290	< 290	< 280
Zr	1150	1150	1150	1100
Ni	29	24	29	18
Co	15	15	10	9
Ti	2950	3400	7000	6000
Cr	115	145	175	140
Cs	< 100	< 100	< 100	< 100
Sr	195	145	100	90
Ba	700	300	600	900
Li	80	60	50	95
Rb	195	240	290	460

Vertisol

Profil: TH 8/12.

Unité alluviale: plaine deltaïque du Mangoky.

Situation: X = 117,4; Y = 493,3; Z = 21,5 m près du village Andranomanitsy.

Végétation: tapis herbacé peu dense à *Cyperus articulatus* (Mita) et *sporobolus, rhyzomatosus* (Matsia), *Cyperus rotundus* (Tsingetsese).

Morphologie:

- 0-40 cm : brun-gris foncé à noirâtre (Munsell à sec 10 YR-5/1, humide 10 YR-4/1) peu humifère; structure polyédrique à prismatique large, fondue. Fortement crevassé, faces de glissement. Très forte cohésion, enracinement important.
- 40-110 cm: horizon grisâtre (Munsell à sec 10 YR-7/1, humide 2,5 Y-5/2); à nombreuses taches blanches calcaires et salines petites, très durci massif à faiblement polyédrique, argilo-sableux fin; très forte cohésion, enracinement faible.
- 110-320 cm: dépôt alluvial brun-jaune clair (Munsell à sec 10 YR-6/4, humide 10 YR-6/3); argilo-sableux fin, à taches blanchâtres nombreuses; massif à faiblement polyédrique.
- 320-350 cm: lit de sable fin argileux jaune-brunâtre (7,5 YR-6/4) à tendance particulière.

Au delà de cette profondeur, alluvions brun-marron à petites taches blanches nettes et fines cristallisations de gypse.

Les dépôts deviennent de plus en plus argileux et on observe vers 5 m des amas poudreux et des concrétions blanches tendres calcaires. A 5,5 m on passe à un sable fin limoneux très micacé, fluviatile typique. Nappe en charge vers 6,4 m.

Caractères physiques et chimiques

Réaction. Neutre, en surface, devient rapidement fortement alcaline en profondeur (pH 9,1-9,5). Les teneurs en calcaire restent faibles (0,5-3,5%) sauf dans les concrétions profondes (6%). Les teneurs en sels solubles sont assez importantes (extrait salin: 0,6-0,8 millimhos avec davantage de chlorures que de sulfates mais le taux de ces derniers a tendance à prédominer en profondeur.

Granulométrie. Le taux d'argile se maintient entre 30 et 50% sauf dans les alluvions anciennes profondes où il atteint 78%. Le rapport limon-argile varie entre 0,3 et 0,5. Il y a deux à cinq fois plus de sable fin que de sable grossier.

Matière organique. Les teneurs en matière organique dépassent peu 1% en surface, sont très faibles dans les horizons sous-jacents. L'humidification est assez bonne et le rapport C/N est voisin de 13 en surface.

Complexe absorbant. Capacité d'échange assez élevée 20-30 meq.% et est sursaturé. Les teneurs en sodium échangeable sont également élevées et le rapport Na/T peut varier de 15 à 35% en profondeur. Les réserves minérales sont très abondantes.

Dans tout le profil, la fraction argileuse est constituée par la montmorillonite en quantité importante, souvent très bien cristallisée, associée à un peu de kaolinite et d'illite.

Éléments traces

Ce type de sol formé sur matériau d'origine alluviale présente des teneurs en éléments traces élevées, notamment en chrome, césium, strontium, baryum, lithium, et rubidium.

Malgré l'abondance de la fraction fine qui est en moyenne de 60%, la plupart des éléments traces étudiés, notamment les métaux: manganèse, plomb, gallium, vanadium, cuivre, zirconium, titane, montrent des teneurs inférieures aux teneurs moyennes trouvées dans les sols malgaches. Cette variation ne peut s'expliquer que si l'on fait intervenir certains facteurs pédo-génétiques. Les teneurs en bismuth, molybdène, étain, argent et zinc, sont insuffisantes pour être décelées. Les résultats d'analyses sont présentés Tableau IV.

TABLEAU IV

Vertisol

Horizons: Profondeur (cm):	TH 8 0,40	TH 9 40-110	TH 10 110-320	TH 11 320-350	TH 12 > 350
Argile < 0,002 mm (%)	48,5	42,5	40,5	29,5	47,00
Limon 0,02-0,002 mm (%)	17,7	13,5	16,7	18,5	25,8
Sable > 0,02 mm (%)	32,2	42,6	41,5	50,9	24,2
SiO ₂ (%)	22,17	16,30	15,10	17,20	22,8
Fe ₂ O ₃ (%)	6,10	4,40	5,40	5,10	6,60
Al ₂ O ₃ (%)	13,00	9,10	10,00	10,00	13,3
Mo (%)	1,2	0,2	0,2	0,2	0,2
pH	7,2	8,4	9,1	9,5	9,5

Éléments traces (p.p.m.)

Mn	1400	750	950	850	950
Pb	19	19	22	19	23
Ga	14	5	14	14	14
Ge	9	10	9	10	9
Bi	< 9	< 10	< 9	< 10	< 9
Mo	< 2,8	< 2,9	< 2,8	< 2,9	< 2,8
Sn	< 2,8	< 2,9	< 2,8	< 2,9	< 2,8
V	95	48	95	95	95
Cu	37	38	56	48	65
Ag	< 2,8	< 2,9	< 2,8	< 2,9	< 2,8
Zn	< 280	< 290	< 280	< 290	< 280
Zr	560	380	470	575	370
Ni	110	75	95	65	95
Co	23	14	19	14	19
Ti	6000	5000	6000	5000	6500
Cr	190	140	190	145	230
Cs	280	240	280	190	185
Sr	930	770	560	430	290
Ba	1300	950	1200	950	950
Li	140	140	110	95	95
Rb	190	140	190	145	95

DISCUSSION

Malgré que notre travail ne traite que d'un nombre réduit de 26 profils typiques de sols, développés sur matériaux originels différents, nous avons obtenu des résultats concluants en ce qui concerne le rôle de la roche mère, de la pédogenèse et de la morphologie des divers constituants du sol, sur la distribution des éléments traces.

L'influence des autres facteurs tels que l'accumulation de la matière organique, l'acidité du sol etc.. ne paraît pas très évidente.

Rôle de la pédogenèse

Les sols ferrallitiques sont dans l'ensemble plus riches que les sols ferrugineux tropicaux. Ceci est confirmé par les résultats obtenus pour les éléments moins mobiles, c'est à dire les métaux lourds (Mn, V, Cu, Ni, Co, Ti, Cr) Tableau V.

Les teneurs observées en éléments plus mobiles (Ba, Sr, Rb, Li) dont la dynamique peut être comparable aux éléments calcium, magnésium, sont sensiblement de même ordre de grandeur pour les sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux. Cette égalité apparente s'explique par le fait que les sols ferrallitiques soient soumis à une pluie beaucoup plus intense que les sols ferrugineux (pluviométrie moyenne de 1,500-2,000 mm pour les sols ferrallitiques contre 600-900 mm pour les sols ferrugineux tropicaux) et que ces éléments étant plus mobiles ont subi une lixiviation ou lessivage plus poussé.

Le rôle de la pédogenèse devient plus évident si on compare différents types de sols sur la même roche mère (calcaire et roches basiques,

TABLEAU V

Comparaison des teneurs en éléments traces dans différents types de sols de Madagascar. Résultats exprimés en p.p.m. de sol séché à 105°C.

	Sols ferrallitiques			Sols ferrugineux			Sols sur alluvions		
	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne
Mn	50	18.300	2.470	90	3.500	940	180	3.500	1.100
Pb	8	95	30	14	175	36	17	52	31
Ga	3	46	12	3	28	11	5	78	32
V	28	530	147	19	320	75	48	180	103
Cu	13	91	44	5	80	29	14	73	34
Zr	20	890	300	180	1.850	700	26	575	137
Ni	14	530	100	3	92	40	20	220	71
Co	5	45	22	3	46	11	5	29	17
Ti	3.300	34.000	10.950	650	14.500	4.500	1.500	10.000	5.600
Cr	20	930	249	50	280	126	60	540	234
Sr	3	710	139	50	600	116	35	930	218
Ba	24	4.400	631	50	1.450	678	250	1.750	800
Li	3	530	83	9	190	71	44	250	105
Rb	10	920	86	20	580	275	90	720	320

Nombre d'échantillons considéré: sols ferrallitiques: 46; sols ferrugineux: 32; sols sur alluvions: 35.

TABLEAU VI

Comparaison des teneurs moyennes en éléments traces dans les sols de Madagascar sur différentes roches. Résultats exprimés en p.p.m. de sol séché à 105°C.

Roches	Mn	Pb	Ga	V	Cu	Zr	Ni	Co	Ti	Cr	Sr	Ba	Li	Rb
Sols ferrallitiques														
Basalte	925	17.5	12	181	50	484	162	8	26.500	672	446	2.780	9	62
Cipolin	7.700	19	11	152	65	390	170	32	5.060	300	75	742	342	18
Calcaire	4.580	41	11	300	20	230	105	22	11.760	614	9	49	234	18
Gneiss	2.350	40	13	158	53	432	105	27	5.800	113	115	394	28	55
Granite	470	40	13	49	46	227	48	17	7.130	123	217	575	45	260
Roche acide	1.000	14	11	98	34	129	47	21	11.400	95	139	762	34	113
Cendre volcanique	840	9	8	159	22	122	18	22	23.600	230	14	27	3	17
Sols ferrugineux tropicaux														
Calcaire	1.190	21	11	163	22	1.250	49	20	5.250	181	185	600	73	214
Roche basique	2.300	88	3	83	54	118	38	17	8.950	134	193	600	58	113
Schiste	127	22	22	47	26	635	52	7	3.025	118	100	325	152	200
Carapace sableuse	750	34	12	34	24	930	19	3	1.750	84	76	825	96	145
Matériau greseux	448	23	13	32	24	504	22	3	4.500	117	99	770	32	147
Grès	253	20	10	22	23	390	43	8	2.180	76	72	950	38	418

Tableau VI). On constate toujours que les sols ferrallitiques sont plus riches en éléments traces que les sols ferrugineux.

Les teneurs élevées en éléments traces des sols formés sur alluvions plus particulièrement en alcalins et alcalino terreux, résultent de plusieurs facteurs qui sont à la base de la classification de ces sols. Ces sols sont caractérisés par un engorgement temporaire ou permanent par l'eau riche en éléments solubles (cas de sols hydromorphes) ou par une hydromorphie de surface (cas de vertisols) avec un taux d'argile très élevé (jusqu'à 90%), autant de conditions favorables au maintien des éléments traces fournis par la roche mère et apportés par l'eau.

Bien que certains auteurs, Mac Kenzie (1959), Oertel (1959), Swaine et Mitchell (1960), Archer (1963), sous estiment le rôle des facteurs pédogénétiques sur la distribution et l'évolution des éléments traces, il nous semble que, pour ces sols de Madagascar, la pédogenèse joue un rôle important. Des facteurs tels que la pluviométrie et la température ont donc une influence marquée et très importante, Wright et al., (1955), Kovda et Vasilyevskaya (1958), Dobrovolsky (1960).

Influence de la roche mère

Les roches éruptives (basalte, granite) et métamorphiques (cipolin, gneiss et roche acide) donnent en moyenne des sols plus riches en éléments traces que les roches sédimentaires (grès, carapace sableuse) et alluvions. On constate de même que les sols développés sur roches compactes (basalte, cipolin, gneiss et calcaire) sont plus riches que ceux formés sur matériaux meubles plus ou moins recimentés (carapace sableuse, grès, cendres volcaniques).

L'ordre des sols développés sur différentes roches mères établi d'après les teneurs en éléments traces est donné dans le Tableau VI.

On constate que cet ordre correspond à une classification des roches d'après leur richesse chimique. La roche mère joue donc un rôle dans la distribution des éléments traces comme les différents auteurs l'ont montré: Maliuga (1944), Mitchell (1955), Swaine (1955), Mac Kenzie (1959), Archer (1963). Par ailleurs, il est très difficile de prouver l'importance d'un facteur tel que la roche mère, sans tenir compte de la pédogénèse.

Il nous semble que ces deux facteurs associés jouent un rôle prédominant dans la distribution des éléments traces des sols.

Autres facteurs

Parmi les autres facteurs susceptibles de pouvoir influencer la répartition des éléments traces dans le sol; la morphologie du profil, l'accumulation de la matière organique, les éléments majeurs et le pH du sol ont été plus souvent étudiés: Vuorinen (1958), Wahhab et Bhatti (1958), Kovda et al. (1958), Pinta et Ollat (1961), Krim (1964) et Hervieu et Nalovic (1965).

Pour les sols de Madagascar étudiés, nous n'avons pas pu constater l'influence de la matière organique sur la répartition des éléments traces dans le sol. Les sols très organiques même (les horizons humifères), avec

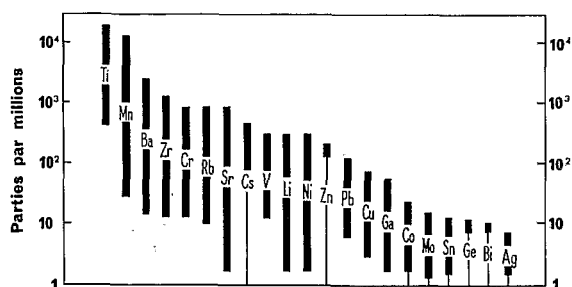


Fig.1. Répartition des éléments traces dans les sols de Madagascar.
 |= teneurs trouvées; | = teneurs possibles mais indosables.

Fig.1. Distribution of trace elements in the soils of Madagascar.
 |= measured contents; | = possible, but not measurable contents.

un taux de matière organique allant jusqu'à 28%, ne présentent pas d'accumulation nette d'éléments traces. Toutefois, pour les éléments tels que le manganèse, le plomb, le vanadium, le cuivre, les alcalins et alcalino-terreux, quelques corrélations entre les horizons organiques et le taux maximal de ces éléments ont été observés pour les profils de sols en place.

D'autre part, on constate que le pH du sol ne présente pas de relation nette avec la répartition des éléments traces dans les profils.

Par contre, la corrélation entre la fraction fine du profil et les teneurs en éléments traces nous paraît plus évidente. Dans la plupart des profils étudiés sauf pour certains sols sur alluvions, les accumulations des éléments traces correspondent aux horizons très argileux. Il n'en est pas de même pour le zirconium dont la teneur maximale semble être liée à la fraction grossière du sol. Ce point est actuellement à l'étude. Les sols sur alluvions avec un taux d'argile allant jusqu'à 90% ont des teneurs en éléments traces égales ou légèrement plus élevées que les sols en place avec un taux d'argile entre 25 et 50%.

Une corrélation entre les éléments majeurs (Fe, Al, etc...) et les éléments traces apparaît nettement. Il est très difficile de dire que cette corrélation est significative et importante, du fait que les teneurs maximales de la plupart des éléments majeurs correspondent aux horizons plus argileux, dont le rôle pour la distribution des éléments traces a été discuté ci-dessus; elle peut en fait être la conséquence des corrélations signalées entre éléments traces et fraction fine.

On observe également une décroissance plus ou moins nette et irrégulière des teneurs en éléments traces avec la profondeur de sols en place.

La comparaison entre les résultats obtenus et ceux présentés par différents auteurs (Maliuga, 1944; Wright et al., 1955; Kovda et Vasilyevskaya, 1958; Vuorinen, 1958; Wahhab et Bhati, 1958; Mac Kenzie, 1959; Oertel, 1959; Dobrovolsky, 1960; Swaine et Mitchell, 1960; Pinta et Ollat, 1961; Archer, 1963; Oertel et Giles, 1963; Krim, 1964) montre que les sols de Madagascar sont très riches en éléments traces totaux (Fig.1).

Cependant, une remarque s'impose au sujet des éléments germanium, bismuth, molybdène, étain, argent, zinc et césium dont la limite de sensibilité

du dosage spectrographique ne permet le dosage que dans quelques cas seulement. Le germanium n'est trouvé qu'exceptionnellement et cela est normal, cet élément étant rarement présent dans les sols; il en est de même pour le bismuth et l'argent. Le molybdène est trouvé le plus fréquemment dans les sols ferrallitiques (nous l'avons décelé et dosé dans 5 profils sur 9 étudiés; il a été trouvé dans deux profils ferrugineux sur 7 et dans un sol sur alluvions sur 10 sols étudiés; le zinc est difficilement discutable car la sensibilité du dosage est médiocre; enfin le césium, également peu sensible spectrographiquement est cependant trouvé principalement dans les sols sur alluvions, et rarement dans les sols ferrallitiques et ferrugineux.

CONCLUSIONS

Les observations faites sur quelques sols typiquement représentatifs des grandes classes de sols malgaches ont été rapportées aussi objectivement que possible; sans tirer de conclusions générales, nous pouvons cependant retenir un certain nombre de résultats caractéristiques jusqu'à présent non signalés par les auteurs et que nous nous proposons de vérifier grâce à l'étude des sols des diverses régions tropicales.

D'une façon générale, les sols malgaches sont chimiquement riches en éléments traces et en oligo éléments, riches par rapport à la moyenne des sols tropicaux et également par rapport aux sols quelque soit leur origine.

La pédogenèse paraît jouer un rôle très net dans la distribution des éléments à l'état de traces dans les profils du sol; les sols ferrallitiques sont dans l'ensemble plus riches que les sols ferrugineux.

L'influence de la roche mère a été clairement mise en évidence dans les profils étudiés; la richesse des sols est en corrélation avec la richesse des roches sous-jacentes.

La matière organique semble jouer un rôle sur la fixation de quelques éléments seulement: manganèse, plomb, vanadium, cuivre. . . . Enfin, la fraction fine du sol est en corrélation très significative avec la distribution des éléments-traces.

BIBLIOGRAPHIE

- Archer, F.C., 1963. Trace elements in some Welsh upland soils. *J. Soil Sci.*, 14(1):144-148.
- Besairie, H., 1937. Contribution à l'étude des sols de Madagascar. *Ann. Géol. Serv. Mines, Tananarive*, 7:65-92.
- Bourgeat, F., Hervieu, J. et Riquier, J., 1964. Présentation de quelques profils de sols ferrallitiques. Étude du milieu pédogénétique dans les environs de Tananarive, colloque UNESCO sur les latérites. *Doc. ronéo. Centre O.R.S.T.O.M. de Tananarive*, p. 87.
- Dobrovolsky, V.V., 1960. Traces elements in some soils and soil forming rocks of Kazakhstan. *Pochvovedenie*, 1960(2): 15-23.
- Hervieu, J., 1958. Notice explicative sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000ème, Feuille 46 Ambovombe, I.R.S.M. Publ., p. 70.
- Hervieu, J., 1959. Notice explicative sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000ème, Feuille No. 63 Ampanihy-Belohà. I.R.S.M. Publ., p. 69.
- Hervieu, J., 1960. Notice sur les cartes d'utilisation des sols: la plaine de Morondava, No. 14, I.R.S.M. Publ., p. 93.

- Hervieu, J., 1961. Profil type de sol malgache - Inventaire provisoire. Doc. ronéo, O.R.S.T. O.M. Tananarive, p. 106.
- Hervieu, J., 1963. Sur l'altération des basaltes crétacées dans l'ouest de Madagascar. Bull. Assoc. Franc. étude Sol, 1:58-72.
- Hervieu, J., 1966. Contribution à l'Étude de l'Alluvionnement en Milieu Tropical. Thèse de Doctorat, Fac. des Sciences de Paris, Paris, 465 pp.
- Humbert, H., 1949. La dégradation des sols à Madagascar. Mémo I.R.S.M., Sér. D, 1(1):33-52.
- Kovda, V.A. and Vasilyevskaya, V.D., 1958. A study of the minor element content in soils of the Amur river region. Pochvovedenie, 1958(9): 68-76.
- Kovda, V.A., Yakushevskaya, J.V. and Tiurinkanov, A.N., 1958. The problem of micro-elements in the soils of the U.S.S.R. Izv. Akad. Nauk U.S.S.R., 1958(4): 562-570.
- Krim, J. Ya., 1964. Content of micro-elements in soils in the interfluvium between the Ural and Sakmari. Pochvovedenie, 1964(10): 73-78.
- Lacroix, A., 1923. Minéralogie de Madagascar. Soc. d'Ed. Geogr. Marit. et Colon., Paris, 3 tomes.
- Mac Kenzie, R.M., 1959. Trace elements in some south Australian terra rossa and rendzina soils. Australian J. Agr. Res., 10(1):52-57.
- Maliuga, D.P., 1944. On the problem of cobalt, nickel, and copper content of soils. Compt. Rend. Acad. Sci. U.R.S.S., 43(1):207-210.
- Mitchell, R.L., 1960. Trace Elements in Chemistry of the Soil - A.C.S. Monograph, - 126. Reinhold, New York, N.Y., 253 pp.
- Mitchell, R.L., 1960. Trace elements in Scottish soils. Proc. Nutrition Soc. Cambridge, 19(2): 148-154.
- Nalovic, L., Gavinelli, E. et Petard, J., 1968. Les méthodes d'analyse des sols et des eaux, utilisées au Centre d'Adiopodoume (Côte d'Ivoire). O.R.S.T.O.M. Publ., 123 pp.
- Nicolls, K.D., 1956. Pedological aspects of trace elements distribution. J. Australian Inst. Agr. Sci., 22(1):45-47.
- Oertel, A.C. 1959. Estimation of the trace element status of large areas of soil. Australian J. Agr. Res., 10(1):58-70.
- Oertel, A.C. and Giles, J.B., 1963. Trace elements contents of some Queensland soils. Australian J. Soil Res., 1:215-222.
- Pinta, M., 1962. Recherches et Dosages des Éléments Traces. Dunod, Paris, 726 pp.
- Pinta, M. et Ollat, C., 1961. Recherches physico-chimiques des éléments traces dans les sols tropicaux. Étude de quelques sols du Dahomey. Geochim. Cosmochim. Acta, 25:14-23.
- Riquier, J., 1957. Latérites et latéritisation à Madagascar. Compt. Rend. Congr. PIOSA, 3ème, Tananarive, Sect. D, pp. 1-8.
- Segalen, P., 1956a. Notice sur la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000, Feuille No. 12, Mintsinjo-Majunga. Mém. I.R.S.M., Sér. D, 7:93-160.
- Segalen, P., 1956b. Notice sur la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000, Feuille No. 13, Marovoay-Mahajamba. Mém. I.R.S.M., Sér. D, 7:161-260.
- Segalen, P., 1956c. Notice sur la carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000, Feuille No. 1, Diego Suarez. Mém. I.R.S.M., Sér. D, 7:261-316.
- Segalen, P., 1956d. Notice sur la carte pédologique au 1/50000 des plaines d'Ambilobe. Mém. I.R.S.M., Sér. D, 7:317-374.
- Segalen, P., 1956e. Étude des sols de la plaine du Bas Sambrano. Mém. I.R.S.M., Sér. D, 7:375-401.
- Segalen, P. et Moureaux, C., 1950. Notice sur la carte pédologique du Bas Mangoky (sud ouest). Mém. I.R.S.M., Sér. D, 2(1):1-95.
- Swaine, D.J., 1955. The trace element content of soils. Commonwealth Bur. Soil. Sci. (Gt. Brit.), Tech. Commun., 48, p.157.
- Swaine, D.J., et Mitchell, R.L., 1960. Trace element distribution in soil profiles. J. Soil Sci., 11(2):347-368.

- Vuorinen, J., 1958. On the amounts of minor elements in Finnish soils. J. Sci. Agr. Soc. Finland, 30(1):30-34.
- Vahhab, A. et Bhatti, H.M., 1958. Trace element status of some West Pakistan soils. Soil Sci., 86:319-323.
- Wright, J.R., Levick, R. et Atkinson, H.J., 1955. Trace elements distribution in virgin profiles representing four great soil groups. Soil Sci. Soc. Am., Proc., 19(3):340-344.